



## Application de la technologie MID à la réalisation d'un circulateur auto- polarisé

Vincent Laur, Jean-Luc Mattei, Patrick Queffelec, R Lebourgeois, Jean Pierre Ganne

### ► To cite this version:

Vincent Laur, Jean-Luc Mattei, Patrick Queffelec, R Lebourgeois, Jean Pierre Ganne. Application de la technologie MID à la réalisation d'un circulateur auto- polarisé. Journées de Caractérisation Micro-ondes et Matériaux, Mar 2016, Calais, France. hal-01302919

**HAL Id: hal-01302919**

**<https://hal.science/hal-01302919>**

Submitted on 15 Apr 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Application de la technologie MID à la réalisation d'un circulateur auto-polarisé

V. Laur<sup>1</sup>, J.L. Mattei<sup>1</sup>, P. Queffelec<sup>1</sup>, R. Lebourgeois<sup>2</sup>, J.P. Ganne<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Bretagne Occidentale, 6 avenue Le Gorgeu, CS93837, 29238 Brest Cedex 3

<sup>2</sup> Thales Research & Technology, 1 av. Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex

Vincent.laur@univ-brest.fr

**Résumé**— Cette article présente la première démonstration expérimentale d'un effet non-réciproque dans des dispositifs réalisés en technologie Molded Interconnect Device (MID). Le substrat est constitué d'un polymère cyclooléfine (COP) mis en forme par moulage dont les propriétés diélectriques ont été étudiées dans la bande d'intérêt. La non-réciprocité est ici obtenue par l'utilisation d'un hexaferri- pré-orienté. En l'absence de champ appliqué, le circulateur présente des pertes d'insertion de 3,32 dB et une isolation proche de 14 dB à 30,7 GHz. Ces performances, bien que modestes, constituent un premier jalon dans la réalisation de circulateurs à bas coût à grande échelle dans cette technologie.

**Mots clés**—Aimantation rémanente, Caractérisations diélectriques, Hexaferri-tes, Mesures hyperfréquences.

## I- INTRODUCTION

La technologie Molded Interconnect Devices (MID) permet, par l'intégration de conducteurs métalliques sur des pièces moulées en plastique, de regrouper des fonctions mécaniques et électriques sur un unique dispositif. Cette technique, couramment utilisée dans l'industrie automobile ou médicale, a fait l'objet de nombreuses études pour son adaptation au domaine des télécommunications, notamment pour la fabrication d'antennes [1]-[3]. Aujourd'hui, des millions d'antennes de téléphones mobiles sont réalisées dans cette technologie. Cependant, la réalisation d'un front-end RF complet requière d'autres étapes sur lesquelles travaillent aujourd'hui les laboratoires telles que l'intégration de fonctions de filtrage ou l'amélioration des procédés de report de composants en surface [4]-[6]. Réaliser des dispositifs non-réciproques (isolateur, circulateur) dans cette technologie est également un défi. En effet, à ce jour, ces dispositifs restent des éléments couteux des systèmes hyperfréquences et la technologie MID pourrait être une solution à la production de masse de circulateurs et isolateurs à faible coût. Dans cet article, la conception, la réalisation et la caractérisation d'un circulateur auto-polarisé (fonctionnant sans aimant), nécessitant l'utilisation d'hexaferri-tes pré-orientés, sera présenté.

Dans une première partie, les propriétés des hexaferri-tes pré-orientées, utilisées pour la réalisation du démonstrateur, seront présentées. Puis, la conception du circulateur, adaptée à cette technologie, sera discutée. Enfin, des mesures hyperfréquences du dispositif seront présentées et comparées à des modélisations électromagnétiques (EM). L'obtention d'un effet non-réciproque en l'absence de champ appliqué sera démontrée.

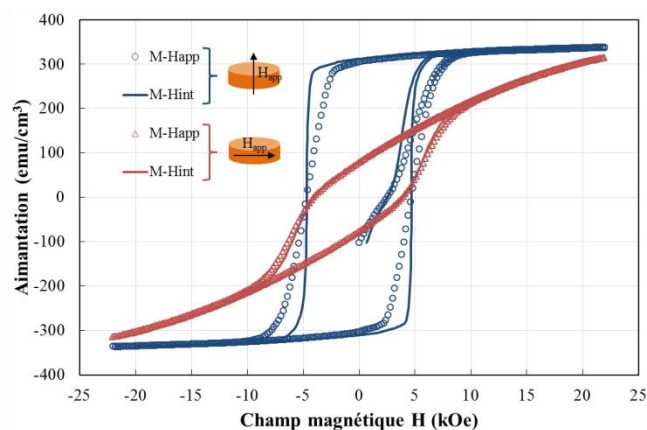
## II- PROPRIETES DES FERRITES

Les ferrites utilisées dans cette étude sont des hexaferri-tes de strontium substituées lanthane et cobalt, noté (La,Co)-SrM. Lors d'études précédentes [7], [8], nous avons montré que ces matériaux permettaient de réaliser des circulateurs auto-

polarisés performant du fait de leur forte aimantation rémanente  $M_r$ . Par ailleurs, les circulateurs réalisés présentent une stabilité en température remarquable, liée aux faibles variations des propriétés des ferrites utilisées dans une gamme de température allant de l'ambient à 120°C [9], [10].

Les cycles d'hystérésis de ces matériaux, mesurés à l'aide d'un Vibrating Sample Magnetometer (VSM MicroSense, LotQuantum), sont présentés sur la figure 1. La mesure a été réalisée sur un cylindre d'hexaferri-te de diamètre  $d = 2,48$  mm et de hauteur  $h = 1,02$  mm. La prise en compte des effets démagnétisants a permis d'extraire les propriétés d'aimantation intrinsèques de ces matériaux.

Un rapport aimantation rémanente sur aimantation à saturation  $M_r/M_s$  de l'ordre de 90% est observé, valeur compatible avec la conception d'un dispositif auto-polarisé. De plus, le champ coercitif élevé de ces matériaux assure une bonne stabilité de l'état de rémanence.



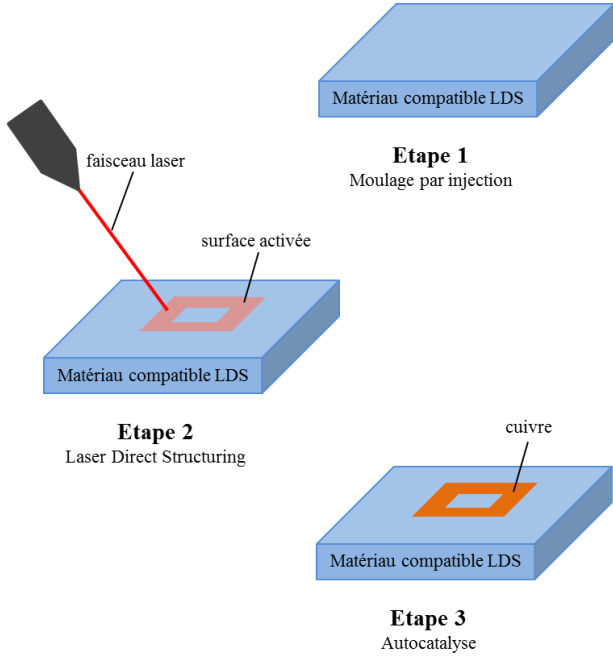
**Figure 1.** Cycle d'aimantation en fonction du champ appliqué d'un cylindre d'hexaferri-te (trait plein : cycles intrinsèques, symbole : cycles extrinsèques).

Les propriétés utilisées pour la modélisation hyperfréquence de ces ferrites sont les suivantes :  $M_s = 4240$  G, champ d'anisotropie  $H_A = 19750$  Oe,  $M_r/M_s = 0,88$ , largeur de raie de résonance à mi-hauteur  $\Delta H = 400$  Oe et permittivité  $\epsilon_r = 21$ .

## III- TECHNOLOGIE MID-LDS : MATERIAUX ET PROCEDES

La technologie MID employée permet de concevoir des circuits aux géométries complexes en 3D par le moulage de matériaux thermoplastiques. Dans notre cas, elle est associée à une technique de métallisation 3D, dénommée Laser Direct Structuring (LDS), nécessitant l'emploi de thermoplastiques chargés de particules organo-métalliques. Le principe de cette technique de métallisation est le suivant : i) balayage sélectif de la surface à l'aide d'un laser pour séparer les atomes métalliques du ligand organique, ii) croissance autocatalytique de cuivre

sur la surface activée. Les étapes clés de la technologie MID-LDS sont illustrées sur la figure 2.

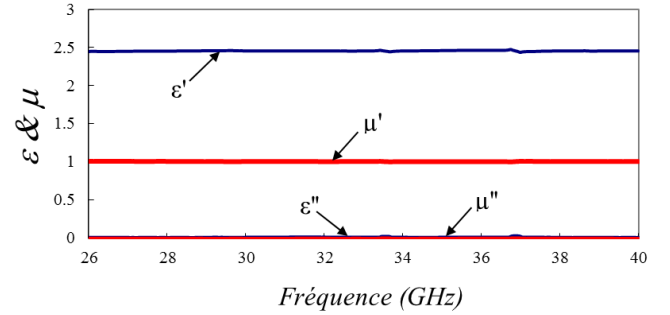


**Figure 2.** Principe de la technologie MID-LDS : moulage par injection, activation de la surface à l'aide d'un laser, croissance autocatalytique des métallisations.

De nombreux matériaux diélectriques sont aujourd'hui compatibles avec le procédé MID-LDS. Cependant, leurs propriétés électromagnétiques sont généralement mal connues. Les pertes diélectriques sont un élément clé dans la réalisation de dispositifs hyperfréquences performants. Des démonstrateurs ont permis de montrer que les polymères compatibles LDS, les polymères à cristaux liquides (LCP Vectra® E820i [4] et E840i [1]), le polyéthylène terephthalate / polybutylène terephthalate (Pocan® DP T7140 LDS [3], [4]) et l'acrylonitrile butadiène styrene / polycarbonate (Xantar® LDS 3710 [4]) possèdent des propriétés diélectriques compatibles avec la réalisation de dispositifs hyperfréquences. Néanmoins, les pertes diélectriques de ces matériaux restent supérieures à  $3.10^{-3}$ , valeur relativement élevée, particulièrement dans le cas d'applications en bande millimétrique. Dans cette étude, notre intérêt s'est focalisé sur un polymère cyclo-oléfine (COP) compatible avec la technologie LDS (Zeonex® RS-420-LDS). Ce thermoplastique possède une constante diélectrique faible, de faibles pertes diélectriques et est relativement insensible aux conditions environnementales d'utilisation en raison de la nature hydrophobe du COP. Les propriétés données par le fabricant sont une permittivité  $\epsilon_r = 2,1$  et des pertes diélectriques  $\tan\delta = 5.10^{-4}$  à 1 GHz.

Des caractérisations hyperfréquences de ce matériau ont été réalisées de façon à confirmer ces propriétés dans la bande de fonctionnement de notre démonstrateur. Pour cela, deux méthodes de caractérisation ont été utilisées. La première est une méthode en guide rectangulaire WR28 basée sur une analyse de type Nicolson-Ross-Weir, développée au Lab-STICC pour la caractérisation de mousses polymères [11]. La seconde est une méthode résonante en cavité basée sur une approche des faibles perturbations [12].

La figure 3 présente les spectres de perméabilité et de permittivité du matériau dans la bande 26-40 GHz, extraits à l'aide de la méthode en guide rectangulaire. La perméabilité reste proche de 1 sur toute la bande de fréquence, résultat attendu pour ce matériau. Les propriétés diélectriques ne présentent pas de dispersion sur la bande avec une valeur constante de la permittivité autour de 2,46 légèrement supérieure à celle donnée par le fabricant. La sensibilité de cette méthode n'est pas adaptée à l'extraction de faibles niveaux de pertes et une méthode en cavité résonante a ainsi dû être employée pour extraire les pertes diélectriques du COP.



**Figure 3.** Spectres de permittivité et de perméabilité du COP dans la bande 26-40 GHz à l'aide d'une méthode en guide rectangulaire.

La caractérisation du matériau à l'aide d'une cavité résonante a permis de confirmer la constante diélectrique du matériau ( $\epsilon_r = 2,48$  à 7 GHz). Par ailleurs, les pertes de ce matériau à 7 GHz sont très faibles ( $\tan\delta = 7,6.10^{-4}$ ) et confirme son potentiel élevé pour la conception de dispositifs hyperfréquences performants en technologie MID-LDS.

#### IV- CONCEPTION DU DISPOSITIF EN TECHNOLOGIE MID-LDS

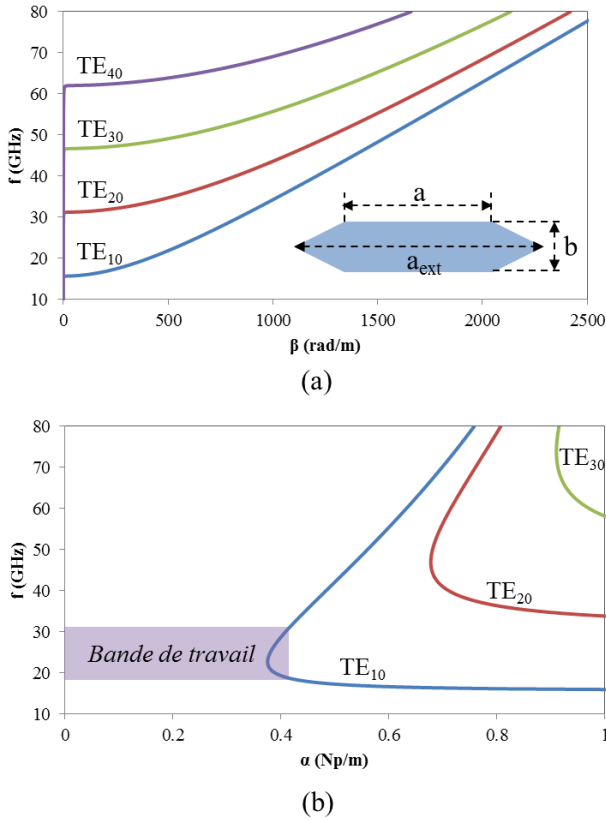
Pour mettre en valeur les possibilités offertes par cette technique 3D, un circulateur en technologie Substrate Integrated Waveguide (SIW) a été étudié. Contrairement à la conception classique de guides SIW consistant à utiliser des vias métalliques pour reconstituer les parois latérales du guide rectangulaire, le guide SIW sera ici obtenu par métallisation 3D de l'ensemble des faces du substrat. La compatibilité avec la technique MID-LDS a été assurée en utilisant des guides dont les parois latérales sont biseautées (Figure 4). Dans ce cas, la détermination de la bande utile de travail (bande monomode  $TE_{10}$ ) ne peut être obtenue à partir de la formule classique :

$$f_{c(m,n)} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \times \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

où  $f_{c(m,n)}$  représente la fréquence de coupure du mode  $TE_{mn}$  ou  $TM_{mn}$ ,  $\epsilon$  la permittivité du matériau,  $\mu$  la perméabilité du matériau,  $a$  la largeur du guide et  $b$  la hauteur du guide. Pour un guide SIW en technologie MID-LDS, la détermination de la bande de travail ne peut se faire qu'à l'aide de simulations électromagnétiques.

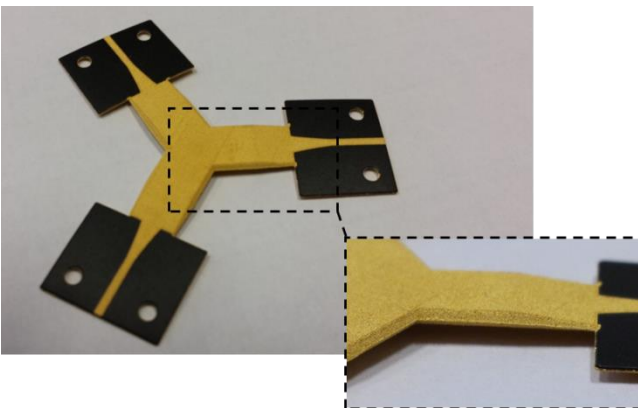
La figure 4 présente ainsi les diagrammes de dispersion d'un guide MID-LDS SIW intégrant un substrat Zeonex RS-420 LDS obtenus par simulation EM. Pour les dimensions considérées, la bande monomode est comprise entre 15,6 GHz ( $f_{c_{TE10}}$ ) et 31,2 GHz ( $f_{c_{TE20}}$ ). La figure 4 montre également que le coefficient d'atténuation  $\alpha$  de la constante de propagation du mode  $TE_{10}$  reste faible entre 18,5 et 31,2 GHz. Cette bande de

fréquences sera considérée pour la suite comme la bande utile de fonctionnement du guide SIW.



**Figure 4.** Diagramme de dispersion des (a) constante de phase  $\beta$  et (b) constante d'atténuation  $\alpha$  de la constante de propagation d'un guide SIW en technologie MID-LDS avec  $a = 5,63$  mm,  $a_{ext} = 6,63$  mm et  $b = 1$  mm (substrat Zeonex RS-420 LDS).

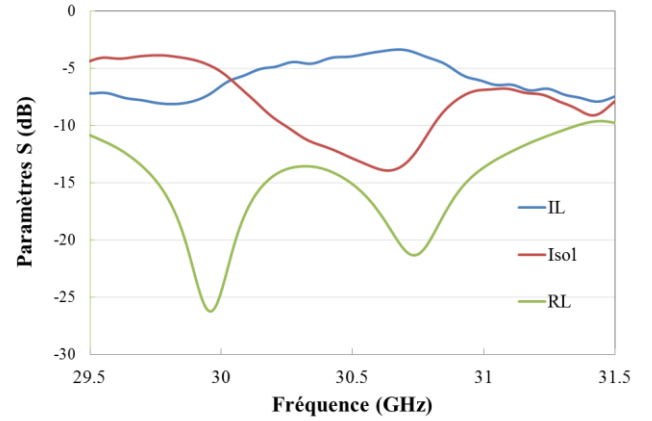
Un circulateur, intégrant des hexaferites (La,Co)-SrM, a été conçu et réalisé à l'aide de la technologie MID-LDS. Ce dispositif est constitué d'une jonction-Y en guide SIW, de transitions SIW-microruban et d'accès microruban (Fig. 5). Il est à noter que la technologie 3D employée nous a permis de modifier l'épaisseur du substrat au niveau de la transition de façon à limiter les pertes métalliques dans le guide SIW tout en assurant une épaisseur suffisamment faible aux accès pour garantir l'obtention d'une impédance de  $50\Omega$  avec des largeurs de ligne raisonnables. La pastille d'hexaferrite est insérée dans une cavité réalisée à postériori. La simulation de ce dispositif prédit des pertes d'insertion minimales de 1,7 dB à 28,8 GHz [13].



**Figure 5.** Circulateur réalisé en technologie MID-LDS.

#### V- CARACTERISATION DU CIRCULATEUR AUTO-POLARISE

Le circulateur a été caractérisé à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel Agilent PNA E8364A. A la suite d'un étalonnage SOLT, le circuit a été relié à l'analyseur à l'aide de transitions microruban-coaxial (End Launch connectors Southwest Microwaves). La figure 6 présente les paramètres S mesurés dans la bande 29,5 – 31,5 GHz. Les pertes minimales du circulateur sont de 3,3 dB à 30,7 GHz. Comparées aux simulations, les mesures mettent en évidence un décalage vers les hautes fréquences de la bande de fonctionnement associées à un accroissement des pertes. Cependant, les transitions utilisées pour la mesure ne sont pas prises en compte dans la simulation ; les pertes engendrées par ces transitions ont été évaluées expérimentalement à 0,8 dB et expliquent en partie les différences observées. Plusieurs pistes sont actuellement à l'étude pour expliquer les divergences entre paramètres S mesurés et simulés : i) une dispersion dans les propriétés des ferrites, ii) des effets dus au montage du circulateur ou aux moyens de mesure.



**Figure 6.** Paramètres S mesurés du circulateur auto-polarisé.

#### VI- CONCLUSION

Un circulateur auto-polarisé intégrant une pastille d'hexaferrite pré-orienté, exploitant les possibilités offertes par la technologie MID-LDS, a été dimensionné, réalisé et caractérisé. Des pertes d'insertion minimales de 3,3 dB, associées à une isolation de 13,9 dB, ont été mesurées à 30,7 GHz. Si ces performances sont pour l'heure modestes, ce circuit reste la première démonstration expérimentale d'un effet non-réciproque en technologie 3D MID.

L'origine des différences observées entre la mesure et la simulation est encore à l'étude. Néanmoins, des améliorations semblent envisageables. Une partie des pertes observées est probablement liée à la qualité des post-métallisations des surfaces et pourrait être abaissée par le surmoulage des pièces en céramique.

#### REFERENCES

- [1] A. Friedrich, B. Geck, O. Klemp, H. Kellermann, "On the design of a 3D LTE antenna for automotive applications based on MID technology", Proceedings of Europ. Micr. Conf., Nuremberg, October 2013.
- [2] D. Kaddour, S. Tedjini, A. Djamel, "3D antenna for UHF RFID Tag On Molded interconnect device", Proceedings IEEE Int. Symp. Ant. Prop. Soc., Orlando, July 2013.
- [3] C. Orlob, Q.H. Dao, D. Komek, "Dual-Polarized Log-Periodic Antenna on a Conical MID Substrate", Proceedings IEEE Europ. Conf. Ant. Prop., Rome, April 2011.

- [4] D. Unnikrishnan, D. Kaddour, S. Tedjini, “*Molded Interconnect Devices for RF applications: Transmission lines and low pass filters*”, Proceedings Int. Symp. Sign. Syst. Electron., Postdam, October 2012.
- [5] M. Dressler, B. Wunderle, K.F. Becker, H. Reichl, “*Reliability study of the stud bump bonding flip chip technology on Molded Interconnect Devices*”, Proceedings Electron. Syst.-Integr. Tech. Conf., Berlin, September 2010.
- [6] U. Kessler, H. Küick, W. Eberhardt, “*Technology for flichip assembly on moulded interconnect devices (MID)*”, Proceedings High Dens. Microsyst. Design and Packag. and Comp. Failure Analysis, Shanghai, July 2004.
- [7] V. Laur, G. Vérissimo, P. Queffelec, L.A. Farhat, H. Alaaeddine, E. Laroche, G. Martin, R. Lebourgeois, J.P. Ganne, “*Self-biased Y-junction circulators using lanthanum- and cobalt-substituted strontium hexaferrites*”, IEEE Trans. Micr. Th. & Tech., **63** (2015), p. 4376-4381
- [8] V. Laur, G. Vérissimo, P. Queffelec, L.A. Farhat, H. Alaaeddine, J.C. Reihls, E. Laroche, G. Martin, R. Lebourgeois, J.P. Ganne, “*Modeling and characterization of self-biased circulators in the mm-wave range*” Proceedings of IEEE Int. Micr. Symp., Phoenix, May 2015.
- [9] V. Laur, R. Lebourgeois, E. Laroche, J.L. Mattei, P. Queffelec, J.. Ganne, G. Martin, “*Etude d'un circulateur auto-polarisé très faibles pertes à 40 GHz : Influence de la température*”, Proceedings Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Calais, mars 2016.
- [10] V. Laur, R. Lebourgeois, E. Laroche, J.L. Mattei, P. Queffelec, J.. Ganne, G. Martin, “*Study of a low-loss self-biased circulator at 40 GHz: influence of the temperature*”, Proceedings IEEE Int. Micr. Symp., San Francisco, May 2016.
- [11] R. Benzerga, V. Laur, R. Lebullenger, L. Le Gendre, S. Genty, A. Sharaiha, P. Queffelec, “*Waste-glass recycling: a step towards microwave applications*”, Materials Research Bulletin **67** (2015), p. 261-265.
- [12] V. Laur, P. Queffelec, “*Cavity-perturbation method improvement by a numerical calibration process*”, Micr. Opt. Tech. Lett., **56** (2014), p. 904-906.
- [13] V. Laur, J.L. Mattei, G. Vérissimo, P. Queffelec, R. Lebourgeois, J.P. Ganne, “*Application of Molded Interconnect Devices technology to the realization of a self-biased circulator*”, J. Mag. Mag. Mat., **404** (2016), p. 126-132.